

Прочность бетона при динамическом нагружении в условиях одноосного и двухосного сжатия

К. А. Цветков

Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет

Аннотация: В работе представлена методика и результаты экспериментальных исследований прочности бетона при одноосном и двухосном сжатии при динамическом воздействии. Результаты исследований представлены в виде наглядных таблиц и графиков. Произведена оценка влияния скорости нагружения и второго главного напряжения на прочность бетона. Предложены пути дальнейшего развития исследований.
Ключевые слова: бетон, прочность, критерий прочности, экспериментальное исследование, одноосное сжатие, двухосное сжатие, динамическое нагружение, коэффициент динамического упрочнения.

Состояние вопроса

Проектирование современных строительных конструкций базируется на действующих нормах, однако в ряде случаев необходима разработка специальных технических условий [1], проведение НИОКР, осуществление исследований, направленных на совершенствование нормативной базы [2]. Такие исследования, в частности, могут быть направлены на попытки более полно учесть особенности поведения конструкционных материалов под нагрузкой.

Известно, что корректные критерии прочности бетона должны учитывать вид напряженного состояния [3,4]. Кроме того, существуют данные о том, что увеличение скорости нагружения бетона приводит к повышению его прочности, которое предлагается учитывать коэффициентом динамического упрочнения ($k_{b,v}$) [5]. В тоже время исследования, посвященные совместной оценке вида напряженного состояния и скорости силового воздействия ограничены и противоречивы [6,7].

Повышение надежности и экономичности бетонных и железобетонных конструкций видится в использовании в расчетах критериев прочности,

полученных непосредственно на основании испытаний при динамическом воздействии. Настоящая работа позволяет внести вклад в накопление экспериментальных данных в этой области исследований.

Цели исследования. Методы.

Целью исследования является получение экспериментальных данных о прочности бетона при одноосном и двухосном сжатии при динамическом воздействии, на основании которых могли бы быть сформулированы предложения по критерию прочности, учитывающим одновременно и фактор скорости нагружения и второго главного напряжения.

Для проведения динамических исследований И.М. Безгодовым была разработана, изготовлена и при участии автора по итогам многочисленных методических опытов подготовлена к осуществлению основных испытаний оригинальная установка [8]. При этом авторами были поставлены и решены нижеследующие задачи. Во-первых, установка должна была доводить до разрушения бетонные образцы с размерами 7x7x28 см за время близкое к 0,1 с. Такое время нагружения соответствует скорости роста напряжений около 300-400 МПа/с, что характерно для режима сейсмического воздействия. Во-вторых, мы стремились сделать установку максимально компактной, пригодной для приведения в работу вручную. И, наконец, существенным было добиться возможности центрирования образца по физической оси.

В итоге ключевую роль в решении поставленных задач сыграло применение мультипликатора. Мультипликатор представляет из себя последовательно соединенные цилиндры малого и большого диаметров. Поршень в малом цилиндре перемещается под воздействием падающего груза, который в свою очередь на проектную высоту поднимается при помощи лебедки. Под воздействием поршня, масло, которое предварительно нагнетается в систему, через небольшое отверстие попадает в большой цилиндр, выполняющий по сути роль гидравлического домкрата, который

оказывает воздействие на образец. Благодаря применению мультипликатора получается существенный выигрыш в силе при сохранении компактности установки (масса падающего груза составляет 30 кг, что оказалось достаточным для разрушения образцов из бетона средних классов по прочности при заданном динамическом режиме нагружения). В свою очередь благодаря применению в составе мультипликатора гидравлического домкрата удавалось центрировать образец по физической оси, что обеспечивалось смещением образца для достижения равенства деформаций каждой грани (фиксируются индикаторами часового типа, которые после центрирования снимались до проведения динамического испытания). Гидравлический домкрат выполняет роль шарнира.

Отдельно следует отметить решение вопроса с измерением нагрузки. Для этого был использован датчик силы – стальной цилиндр с наклееными на него четыремя тензодатчиками, последовательно соединенными друг с другом, и включенными в мостовую схему. Датчик силы был оттарирован при статическом нагружении на соответствие изменению электрического напряжения (возникает за счет изменения сопротивления тензодатчиков при их деформировании) и величиной нагрузки. Для повышения чувствительности датчика силы необходимо стремиться к его минимальной площади поперечного сечения, при этом не допуская неупругие деформации датчика. Кроме того, эффективным может быть применение датчика силы из материала с модулем упругости меньшим, чем у стали, например, из дюраль алюминия.

Динамические параметры установки (время нагружения, скорость роста напряжений) могут меняться за счет изменения массы груза и высоты его падения.

В наших экспериментах был реализован режим нагружения со следующими параметрами:

Скорость роста нормальных напряжений в поперечном сечении: $\dot{\sigma} \approx 500 \text{ МПа/с}$;

Скорость относительных продольных деформаций: $\dot{\varepsilon} \approx 50000t \text{ е.о.д./с}$
(t – время с момента начала силового воздействия);

Время разрушения образцов: $\tau \approx 0,08 \text{ с}$.

Таким образом, разработанное испытательное оборудование позволяет осуществлять динамическое нагружение бетона, которое в [9] классифицируется как нагружение при повышенных скоростях. Следует отметить, что в силу нелинейности диаграммы деформирования бетона реализовать режим нагружения при котором и скорость роста нагружения, и скорость роста деформаций оказались бы постоянными не представляется возможным. В нашем случае скорость нагружения постоянна, а вот продольные деформации возрастает по линейному закону.

Для проведения испытаний в условиях двухосного сжатия и напряженного состояния «сжатие-растяжение» были решены задачи по выбору способа приложения нагрузки в направлении σ_2 , после чего были выбраны соответствующие приспособления для создания боковой нагрузки.

Известно, что имеется два принципиально разных способа передачи нагрузки на испытываемый образец: гидростатический и механический (при помощи жестких плит) [10]. В первом случае обеспечивается постоянство напряжения σ_2 . Перераспределение напряжений в образце при этом не происходит или незначительно. Вследствие этого при деформировании образца возникает ограниченное число трещин. Во втором же случае (при использовании жестких плит) реализуется условие: $\varepsilon_2 = \text{const}$, что способствует перераспределению напряжений на более прочные зоны, ранее возникшие трещины препятствуют образованию новых. В [11] отмечается, что для получения однородного напряженного состояния предпочтительно использовать гидростатический способ передачи нагрузки.

С учетом вышесказанного в наших исследованиях для создания напряжений σ_2 был выбран гидростатический способ передачи нагрузки. Для этих целей испытательные стенды были доукомплектованы установками мембранного типа, разработанными ранее в МИСИ (МГСУ).

Следует отметить, что с использованием мембранных установок для создания бокового давления применяемых нами в различное время были успешно проведены экспериментальные исследования бетона при сложных напряженных состояниях при статическом [12], длительном [13] и динамическом [14] нагружениях. Для повышения долговечности установки резиновая мембрана была заменена на камеру, выполненную из малопластичной стали. Такая мера позволила довести величину бокового обжатия до 20 МПа.

Двухосное сжатие создавалось по следующей методике. В направлении перпендикулярном оси образца-призмы при помощи описанных выше установок мембранного типа создавалось напряжение σ_2 , т.е. в данном направлении реализовывалось статическое нагружение. Испытывались образцы при уровнях нагружения $\sigma_2 = 0,2R_b$; $\sigma_2 = 0,4R_b$ и $\sigma_2 = 0,6R_b$, где R_b – прочность при осевом сжатии. При этом образцы доводились до разрушения осевой динамической нагрузкой в описанном выше режиме.

Кроме того, производились испытания образцов при статическом осевом и двухосном сжатии.

Результаты испытаний при одноосном сжатии.

В настоящее время накоплен существенный объем экспериментальных данных, дающих представление о величине коэффициента динамического упрочнения при одноосном сжатии [15,16]. Проводя экспериментальные исследования при одноосном сжатии в рамках настоящей работы, мы могли пополнить существующие данные только одним значением $k_{b,v}$ на кривой зависимости $k_{b,v}(\dot{\sigma})$, так как скорость роста напряжений при динамических

испытаниях не варьировалась. В тоже время величины прочности при осевом статическом сжатии (R_b), осевом сжатии при динамическом нагружении ($R_{b,d}$) и $k_{b,v}$ являются базовыми для последующей оценки влияния скорости нагружения на прочность бетона при двухосном сжатии, получение этих характеристик из одноосных испытаний представлялось необходимым.

Результаты одноосных испытаний были сопоставлены со значениями $k_{b,v}$, вычисленными при соответствующих скоростях, и приведенных, например, в [16]. Зафиксированный нами $k_{b,v} = 1,17$ находится в зоне значений, полученных другими исследователями. Данное обстоятельство также косвенно свидетельствует о корректности проведения испытаний и регистрации нагрузки.

Таблица №1

Прочность бетона при одноосном сжатии (статические и динамические режимы нагружения)

Режим нагружения	Маркировка образца	Прочность R_{ib} ($R_{ib,d}$), МПа
Статические испытания	2С	20,24
	4С	20,06
	8С	20,93
	Среднее значение:	20,41
Динамические испытания	15Д	22,80
	26Д	25,10
	33Д	24,00
	Среднее значение:	23,97

Результаты испытаний при двухосном сжатии.

В рамках исследования было испытано 15 образцов-призм, в т.ч. 7 при статическом и 8 динамическом нагружении. При этом для каждого режима нагружения испытывалось не менее 2-х образцов для каждого уровня бокового обжатия, составляющих $0,2R_b$, $0,4R_b$ и $0,6R_b$. Результаты испытаний по каждому образцу и средняя прочность приведены ниже.

При этом поясним, что под прочностью $R_b(\sigma_2)$ и $R_{b,d}(\sigma_2)$ мы понимаем, напряжение σ_1 (нормальное напряжение в поперечном сечении образца), при котором происходит разрушение образца при соответствующем уровне напряжения σ_2 (напряжения, достигаемого за счет бокового обжатия образца статической нагрузкой). $R_b(\sigma_2)$ соответствует статическому приложению осевой нагрузки, $R_{b,d}(\sigma_2)$ – динамическому.

Таблица №2

Результаты испытаний при двухосном сжатии (статическое нагружение)

Уровень напряжения σ_2 (σ_2/R_b)	Маркировка образца	Прочность R_{ib} ($R_{ib,d}$), МПа
0,2	9С	26,98
	19С	26,24
	20С	26,50
	Среднее значение:	30,89
0,4	12С	22,80
	29С	33,97
	Среднее значение:	27,34
0,6	1С	29,39
	32С	28,57
		28,98

Таблица №3

Результаты испытаний при двухосном сжатии (динамическое нагружение)

Уровень напряжения σ_2 (σ_2/R_b)	Маркировка образца	Прочность R_{ib} ($R_{ib,d}$), МПа
0,2	5Д	32,02
	10Д	30,23
	28Д	30,42
	Среднее значение:	30,89
0,4	11Д	35,30
	27Д	32,80
	30Д	33,80
	Среднее значение:	33,97
0,6	14Д	34,68
	31Д	35,40
	Среднее значение:	35,04

Интерпретация и анализ результатов испытаний.

Анализируя совместно данные, приведенные в таблицах 2 и 3 можно прийти к следующим выводам.

Как при статическом, так и при динамическом нагружении, вид напряженного состояния и уровень напряжения σ_2 существенно влияют на прочность бетона. Наиболее заметное увеличение прочности происходит при переходе от одноосного сжатия к двухосному и при небольшом значении второго главного напряжения σ_2 . При повышении уровня бокового обжатия от $0,2R_b$ до $0,6R_b$ прочность бетона также повышается. Так, увеличение прочности при $\sigma_2=0,6R_b$ как при статике, так и динамике составляет более 40% по сравнению с прочностью при одноосных испытаниях с соответствующей скоростью нагружения.

Таблица 4

Влияние вида напряженного состояния и уровня
напряжения σ_2 на прочность бетона при статическом и динамическом
нагружении

Статика				
Прочность, коэффициенты	Одноосное сжатие	Двухосное сжатие		
		$\sigma_2=0,2R_b$	$\sigma_2=0,4R_b$	$\sigma_2=0,6R_b$
R_b или $R_b(\sigma_2)$, МПа	20,41	26,57	27,34	28,98
$k_b(\sigma_2) = \frac{R_b(\sigma_2)}{R_b}$	1	1,30	1,34	1,42
Динамика				
$R_{b,d}$ или $R_{b,d}(\sigma_2)$, МПа	23,97	30,89	33,97	35,04
$k_{b,d}(\sigma_2) = \frac{R_{b,d}(\sigma_2)}{R_{b,d}}$	1	1,29	1,42	1,46

Вид напряженного состояния и уровень бокового обжатия влияют на коэффициент динамического упрочнения, однако в меньшей мере, чем скорость нагружения. Незначительное повышение $k_{b,v}(\sigma_2)$ по сравнению с $k_{b,v}$ наблюдали при двухосном сжатии с уровнем бокового обжатия $0,4R_b$ и $0,6R_b$.

Изменение прочности при повышении скорости нагружения и наличии второго главного напряжения наглядно представлено на рисунке ниже.

$$R_b(\sigma_2)/R_b \quad (R_{b,d}(\sigma_2)/R_{b,d})$$

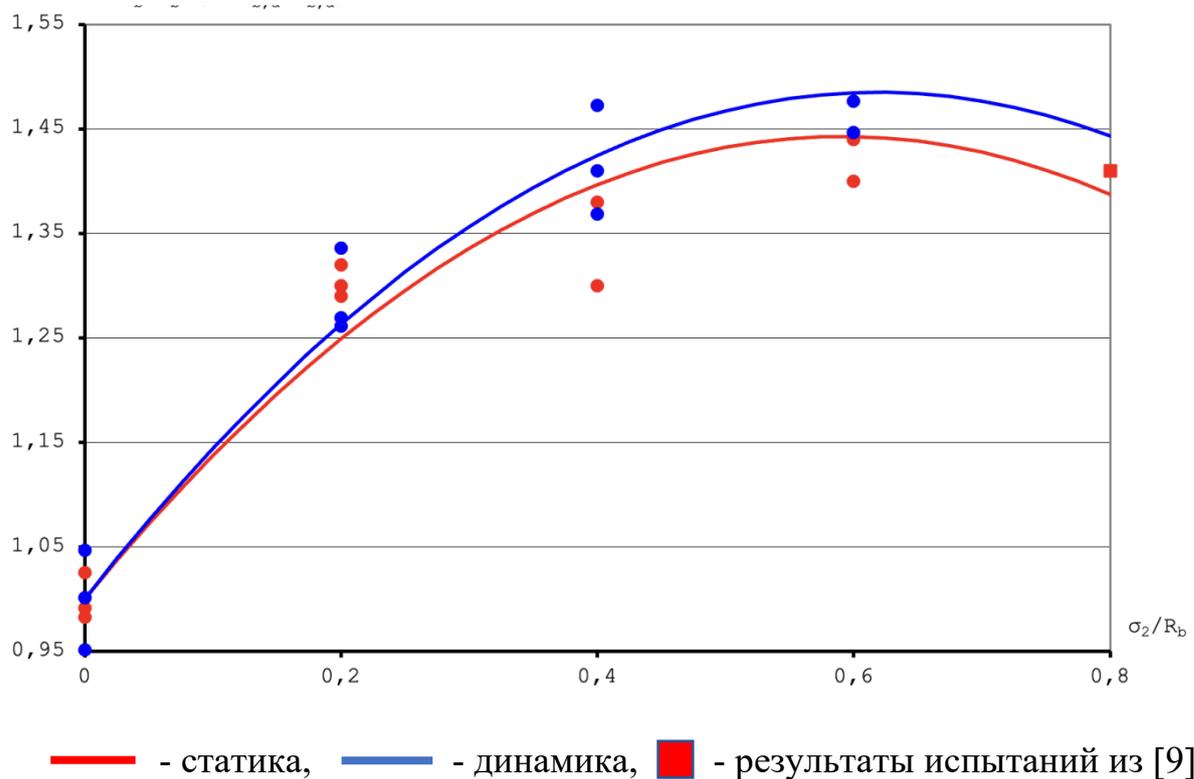


Рис.1 – Влияние скорости нагружения и второго главного напряжения на прочность бетона

Апробация результатов исследований в решении тестовой задачи.

В целях предварительной оценки влияния факторов скорости нагружения и второго главного напряжения на результаты оценки прочности конструкции предлагается рассмотреть решение следующей задачи.

Предположим, что распределение напряжений в конструкции соответствует известному из теории упругости решению задачи Ляме (задачи о напряженно-деформированном состоянии толстостенного цилиндра, находящегося под действием осесимметричной нагрузки). В стенке цилиндра возникает двухосное напряженное состояние.

Поставим смешанные граничные условия:

$$\text{При } r = a \quad u = 0, \text{ при } r = b \quad \sigma_r = -p_2$$

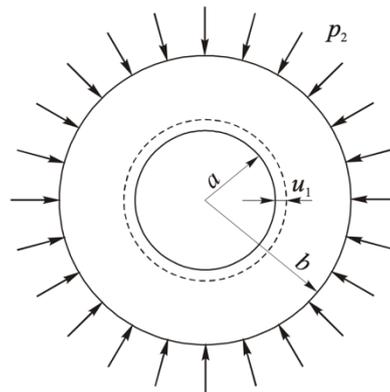


Рис. 2 – Постановка задачи Ляме

Тогда радиальные и тангенциальные напряжения могут быть вычислены по следующим формулам соответственно:

$$\sigma_r = \frac{-p_2}{(1 - \mu)c^2 + (1 + \mu)} \left[(1 + \mu) + (1 - \mu) \frac{c^2}{k^2} \right];$$

$$\sigma_\theta = \frac{-p_2}{(1 - \mu)c^2 + (1 + \mu)} \left[(1 + \mu) - (1 - \mu) \cdot \frac{c^2}{k^2} \right], \text{ где}$$

$$k = \frac{r}{b}, \quad a \leq r \leq b, \quad c = \frac{a}{b}, \quad \mu - \text{коэффициент Пуассона.}$$

Решим задачу для следующих числовых данных:

$$c = a/b = 0,5, \quad \mu = 0,3$$

Получим:

$$\sigma_r = -0,68p_2 \left(1,3 + \frac{0,175}{k^2} \right);$$

$$\sigma_\theta = -0,68p_2 \left(1,3 - \frac{0,175}{k^2} \right).$$

Как известно, в силу полярной симметрии касательные напряжения $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r}$, а значит σ_r и σ_θ – главные напряжения.

На рисунке 3 кривые 1 и 2 – графики распределения по толщине стенки цилиндра относительных напряжений $\frac{\sigma_\theta}{p_2}$ и $\frac{\sigma_r}{p_2}$ соответственно.

Для иллюстрации возможности применения критериев прочности, графическая интерпретация, которых была представлена на рис.1, рассуждаем следующим образом.

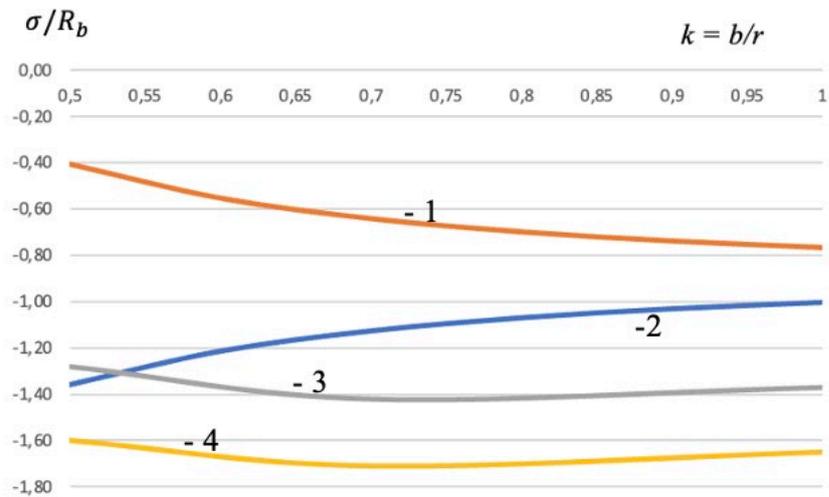
Пусть $p_2 = R_b$, где R_b – призмочная прочность бетона.

Тогда $\frac{\sigma_\theta}{p_2} = \frac{\sigma_2}{R_b}$, где $\frac{\sigma_2}{R_b}$ – соотношение опасного второго главного напряжения к призмочной прочности бетона – значения на горизонтальной оси в критерии прочности на рис.1.

В нашей задаче $\frac{\sigma_2}{R_b}$ является функцией от $k = \frac{b}{r}$.

Совместно анализируя зависимость $\frac{\sigma_1}{R_b}(\sigma_2)$ из критерия прочности и $\frac{\sigma_2}{R_b}(k)$, можно построить график распределения по толщине цилиндра опасного в смысле потери прочности при совместном действии двух главных сжимающих напряжений соотношения $\frac{\sigma_1}{R_b}(k)$. На рис. 3 – это кривая 3 для критерия прочности, учитывающего влияние только второго главного напряжения и кривая 4, которая дополнительно учитывает влияние скорости нагружения на изменение прочности бетона (с некоторой долей условности будем считать, что в тангенциальном направлении имеет место статическое нагружение, а в радиальном – динамическое).

Полученные результаты интерпретируем так: если кривая $\frac{\sigma_1}{R_b}(k)$ лежит ниже кривой 2, то прочность обеспечена, в противном случае – нет. Таким образом, отмечаем, что если не учитывать влияние на повышение прочности скорости нагружения, то фиксируем зону потери прочности вблизи внутренней поверхности цилиндра. В то время как, если этот фактор учитывать, то прочность обеспечена по всей толщине стенки.



$$1 - \frac{\sigma_{\theta}}{p_2} = \frac{\sigma_2}{R_b}, \quad 2 - \frac{\sigma_r}{p_2} = \frac{\sigma_r}{R_b}, \quad 3 - \frac{\sigma_1}{R_b}(\sigma_2), \quad 4 - \frac{\sigma_1}{R_b}(\sigma_2, k_{b,v}),$$

Рис. 3. - К иллюстрации применения критерия прочности

Выводы по результатам исследований:

1. Разработана оригинальная методика проведения испытаний бетонных образцов при одноосном и двухосном сжатии, отработаны методы регистрации нагрузки.
2. Получены сведения о взаимном влиянии скорости нагружения и вида напряженного состояния.
3. Алгоритм использования критерия прочности проиллюстрирован на решении тестовой задачи оценки прочности толстостенного цилиндра.
4. Результаты исследований могут быть использованы для совершенствования критериев прочности бетона.
5. Исследования могут иметь развитие как в направлении варьирования скорости нагружения, так и видов напряженного состояния с опорой на отработанную методику.

Литература

1. Шумейко В.И., Кудинов О.А. Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
2. Набокова Я.С. Эффективные строительные материалы и способы возведения зданий // Инженерный вестник Дона 2008, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96.
3. Викулов М. А., Ефрюшин С. В. Метод построения области предельной несущей способности идеально пластических композитных сечений стержней при сложном напряженном состоянии // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 3(31). – С. 76-83.
4. Давиденко А. А., Давиденко А. И. К обоснованию критерия прочности бетона при двухосном сжатии // Бетон и железобетон. – 2024. – № 3(622). – С. 13-19.
5. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. - М.: Стройиздат, 1971.-271с.
6. Gran G.K. Dynamic concrete testing, instrumentation development, soil-structure interface characterization and airblast simulation analyses to support hard silo development.-DNA-TR-85-264.SRI Int. Menlo Park.Galif.-1985.
7. Яшин А.В. Прочность и деформации бетона при различных скоростях динамических и многократно повторяющихся нагрузок на бетон и элементы железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1972. - 40с.
8. Малашкин Ю. Н., Безгоднов И. М., Цветков К. А. Методические особенности исследования деформативно - прочностных характеристик бетона при динамическом нагружении в условиях сложных напряженных

состояний // Естественные и технические науки. – 2007. – № 1(27). – С. 182-190.

9. Копнов В.А., Воронин А.Н. Учет скорости нагружения в критериях прочности анизотропных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - Выпб.1996.- С.7-11.

10. Малашкин Ю.Н., Безгодов И.М. Влияние способа приложения нагрузки на прочность бетона при осевом сжатии // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Свойства бетона, определяющие его трещиностойкость.- вып.112, 1976. - Л.: «Энергия» - С.93-96.

11. Малашкин Ю.Н., Безгодов И.М. Оценка предельных состояний бетона при двухосном сжатии: Материалы конференций и совещаний по гидротехнике: Предельные состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений. - Л.: Энергоиздат,1982- С.7-15.

12. Малашкин Ю.Н., Безгодов И.М. Длительная прочность и предельная деформативность бетона при одно- и двухосном сжатии. В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования прочности и жесткости элементов строительных конструкций. Сб. научных трудов под. редакцией Г.С.Варданяна. - М.:МГСУ,1995. - С.199-205.

13. Коробцева О. В. Работы бетона при малоцикловом и однократном динамическом нагружении в условиях сложных напряженных состояний: специальность 01.02.04 "Механика деформируемого твердого тела": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Коробцева Ольга Владимировна. – Москва, 1992. – 25 с.

14. Цветков С.В. Динамическая прочность тяжелого бетона при одноосном сжатии // Технологии бетонов. – 2019. – № 3-4(152-153). – С. 26-28.

15. Lundeen R.L. Dynamic and static tests of plain concrete specimens.- U.S. Army Corps of Engrs. Waterways Experiment Station.-1964.Rep.11- p.12-18.

16. Радионов А.К. Прочность гидротехнического бетона при динамических воздействиях. В кн.: Предельные состояния бетонных и железобетонных конструкций энергетических сооружений. - С - Пб.: Атомэнергоиздат,1993. - С.143-146.

References

1. Shumeyko V.I., Kudinov O.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2164.
2. Nabokova Ya.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2008, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2008/96.
3. Vikulov M. A., Efryushin S. V. Nauchnyy vestnik Voronezhskogo okhrany avariyno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2013. № 3(31). pp. 76-83.
4. Davidenko A. A., Davidenko A. I. Beton i zhelezobeton. 2024. № 3(622). pp. 13-19.
5. Bazhenov Yu. M. Beton pri dinamicheskom nagruzhении [Concrete under dynamic loading]. M.: Stroyizdat, 1971. 271 p.
6. Gran G.K. Dynamic concrete testing, instrumentation development, soil-structure interface characterization and airblast simulation analyses to support hard silo development. DNA-TR-85-264. SRI Int. Menlo Park. Calif. 1985.
7. Yashin A.V. Prochnost' i deformatsii betona pri razlichnykh skorostyakh dinamicheskikh i mnogokratno povtoryayushchikhsya nagruzok na beton i elementy zhelezobetonnykh konstruktsiy [Strength and deformation of concrete at different rates of dynamic and repeated loads on concrete and elements of reinforced concrete structures]. M.: Stroyizdat, 1972 . 40 p.
8. Malashkin Yu. N., Bezgodov I. M., Tsvetkov K. A. Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki. 2007. № 1(27). pp. 182-190.

9. Копнов V.A., Voronin A.N. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh sooruzheniy i konstruktsiy. Vyp. 6.1996. pp.7-11.

10. Malashkin YU.N., Bezgodov I.M. Vliyaniye sposoba prilozheniya nagruzki na prochnost' betona pri osevom szhatii. [Proceedings of the coordination conferences on hydraulic engineering. Properties of concrete that determine its crack resistance]. vvp. 112, 1976. L.: "Energy". pp.93-96.

11. Malashkin YU.N., Bezgodov I.M. Otsenka predel'nykh pokazateley betona pri dvukhosnom szhatii: Materialy konferentsii i materialy po gidrotekhnike [Limit states of concrete and reinforced concrete structures of power facilities]. L.: Energoizdat,1982. pp.7-15.

12. Malashkin YU.N., Bezgodov I.M. Dlitel'naya prochnost' i predel'naya deformativnost' betona pri odno- i dvukhosnom szhatii. [Theoretical and experimental studies of the strength and rigidity of elements of building structures]. M.: MGSU, 1995. pp.199-205.

13. Korobtseva O. V. Rabotosposobnost' betona pri malotsiklovom i odnokratnom dinamicheskom nagruzhении v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya [Concrete performance under low-cycle and single dynamic loading under complex stress condition]: spetsial'nost' 01.02.04 «Mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela»: avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk Korobtseva Ol'ga Vladimirovna. M., 1992. 25 p.

14. Tsvetkov S.V. Concrete technologies . 2019. No. 3-4(152-153). pp. 26-28.

15. Lundeen R.L. Dynamic and static tests of plain concrete specimens. U.S. Army Corps of Engrs. Waterways Experiment Station.1964.Rep.11.

16. Radionov A.K. Prochnost' gidrotekhnicheskogo betona pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [Ensuring the condition of concrete and reinforced



concrete structures of building structures]. St. Peterburg: Atomenergoizdat, 1993.
pp. 143-146.

Дата поступления: 14.11.2024

Дата публикации: 1.01.2025